

А. А. Иванова, А. С. Колпаков, Л. Г. Гальперин
Уральский федеральный университет, Екатеринбург
a.s.kolpakov@urfu.ru

АНАЛИЗ УСТОЙЧИВОСТИ ВИБРОКИПЯЩЕГО СЛОЯ ДИСПЕРСНОГО МАТЕРИАЛА

Технологии виброожижения дисперсных систем позволяют существенно интенсифицировать процессы тепломассопереноса и увеличить тем самым производительность агрегатов, в частности при получении металлических порошков из соответствующих оксидов. Вариант постановки задачи исследования структуры виброожиженных систем рассматривается ниже.

Ключевые слова: *виброожиженный слой; устойчивость; дисперсная система*

A. A. Ivanova, A. S. Kolpakov, L. G. Halperin
Ural Federal University, Ekaterinburg

VIBROFLUIDIZED BED DISPERSED MATERIAL STABILITY ANALYSIS

Vibrofluidized technology of dispersed systems makes it possible to intensify heat- and mass transfer processes. That resulted in unit capacity rising, for instance with metal powder production from corresponding oxides. The way of statement of the problem to investigate vibrofluidized system structure is observed.

Key words: *vibrofluidized bed; stability; dispersed system*

В вертикально колеблющемся слое сыпучего материала наблюдаются явления, аналогичные происходящим в обычной жидкости: образование поверхностных структур, похожих на волны Фарадея, аналогия эффекта Лейденфроста и конвективные течения, подобные явлению Рэлея–Бенара в подогреваемом снизу слое жидкости [1]. Для их описания, таким образом, правомерно применение системы уравнений гидродинамики: уравнения

непрерывности и уравнения Навье–Стокса. Анализ обстановки в плоском слое дисперсного материала, подверженного воздействию вертикально вибрирующей плоской поверхности, произведен в [2, 3] на основе численного решения этой системы. Вклад сил межфазного взаимодействия под влиянием вибраций, отличающих дисперсный материал от вязкой однородной жидкости и учитывающий силы тяжести, силы аэродинамического взаимодействия жидкости (газа) в межчастичных промежутках с отдельными дисперсными частицами в стоксовском приближении включается в состав уравнения Навье–Стокса, что вполне допустимо в случае сильно разбавленных смесей.

Между тем, эффективные свойства (плотность, вязкость) движущейся дисперсной среды, рассматриваемой как псевдожидкость, в особенности подверженной вибрационным воздействиям, существенно отличаются от рассчитанных на основе представления о смеси двух сред, занимающих свою долю объема.

Если дополнительно псевдожидкость подвергается вибрационным воздействиям (виброожигенная среда), то эффективная плотность рассчитывается по формуле, учитывающей частоты вибрации [4]

$$\frac{\rho^*}{\rho} = 1 + \left[\frac{\frac{1+\gamma}{\Delta+\gamma} + \frac{1}{(\omega\tau)^2}}{1 + \frac{1}{(\omega\tau)^2}} \right] \alpha(\Delta-1), \quad (1)$$

где ω , τ – частота колебаний и время релаксации включений; γ – коэффициент присоединенной массы, для частицы сферической формы $\gamma = 0,5$; ρ_0 – плотность вещества частиц; ρ – плотность сплошной среды; α – объемная доля дисперсной фазы; $\Delta = \rho_0/\rho$.

Время релаксации частиц в виброкипящем слое можно оценить из сравнения силы сопротивления частицы в увлекающем ее потоке сплошной среды и силы ее инерции. В стоксовском приближении имеем

$$\tau = \frac{\rho_0 d^2}{18\rho\nu} = \frac{\rho_0 d^2}{18\mu}. \quad (2)$$

Для смеси сплошной среды и дисперсных частиц в стационарном состоянии (в случае сильно вязкой «вмороженной» сплошной фазы) соответствующее выражение для эффективной плотности среды имеет вид

$$\rho^* = \rho_0 \alpha + \rho(1 - \alpha). \quad (3)$$

Эффективная вязкость виброожиженной дисперсной среды зависит от ряда факторов и определяется в основном по экспериментальным данным. Для маловязкой сплошной среды как следует из [4] эффективная вязкость может быть рассчитана по выражению

$$\frac{\mu^*}{\mu} = \frac{18\alpha(1 - \Delta)^2}{[2\Delta(1 - \alpha) + (1 + 2\alpha)]^2}, \quad (4)$$

где μ – вязкость сплошной фазы; $\delta = \sqrt{\frac{2\mu}{\rho\omega}} \ll R$.

Распространение плоской продольной волны при виброожижении дисперсной смеси описывается волновым уравнением [4]

$$\rho^* \frac{\partial^2 U}{\partial t^2} + \mu^* \frac{\partial U}{\partial t} = \left[K^* + \frac{4}{3} M^* \right] \frac{\partial^2 U}{\partial y^2}, \quad (5)$$

K^* , M^* – эффективные упругие или вязкоупругие модули гетерогенной среды.

Скорость распространения затухающих колебаний по вертикали в виброожиженной дисперсной среде описывается выражением [3, 4]

$$U = U_0 \exp\{i(\omega t - ky)\}, \quad (6)$$

(ось y ориентирована вертикально вверх от плоскости колеблющейся опорной поверхности). Граничные условия к уравнению распространения колебаний в псевдожидкости следует формулировать аналогично [2, 3].

Описание явления Лейденфроста по аналогии с [5] и упорядоченных структур, аналогов ячеек Бенара–Релэ, возможно введением в систему уравнения «гранулярной» температуры [1], которую можно определить как величину пропорциональную кинетической энергии элемента объема псевдожидкости в точке

$$T = \rho^* \frac{v_y^2}{2}. \quad (7)$$

Использование в расчетах теплофизических параметров псевдожидкости в целом, учитывающих влияние вибраций, позволит, используя методы, предложенные в [5, 6], получить более адекватное описание ряда эффектов.

Реализация рассматриваемого подхода возможна аналогично [2, 3] только численно, с использованием, с большим основанием, расчетных пакетов, описывающих течение однофазных сред.

Список использованных источников

1. Вайсберг Л. А., Демидов И. В., Иванов К. С. Механика сыпучих сред при вибрационных воздействиях: методы описания и математического моделирования // Обогащение руд. 2015. № 4. С. 21–31.
2. Пирожков Д. Н. Механико-технологические основы создания кормоприготовительных машин с вибрируемым зернистым слоем : автореферат дис. ... докт. техн. наук : 05.20.01 / Пирожков Дмитрий Николаевич; [Место защиты : Алт. гос. техн. ун-т им. И. И. Ползунова]. Барнаул, 2012. 34 с.
3. Федоренко И. Я., Пирожков Д. Н. Критерии подобия гидродинамических моделей виброкипящего слоя сыпучего материала // Вестник Алтайского государственного аграрного университета. 2007. № 1 (17). С. 105–108.
4. Федотовский В. С. Обобщенная проводимость и колебательно-волновые процессы в гетерогенных средах. Обнинск : ГНЦ РФ Физико-энергетический институт им. А. С. Лейпунского, 2005. С. 112–117.
5. Бувеч Ю. А., Манкевич В. Н. К теории явления Лейденфроста // Теплофизика высоких температур. 1982. Т. 20, вып. 6. С. 1136–1144.
6. Шехтер Р. С. Вариационный метод в инженерных расчетах. М. : Мир, 1971. 292 с.